

Integrierte Fahrzeugregelung durch einen hybriden Ansatz aus inversem Modell und modellprädiktiver Optimierung

J. Köppern†

†Institut für Robotik und Mechatronik, Abteilung für Regelungstechnik und Mechatronik, DLR, 82234 Oberpfaffenhofen-Wessling, Tel: +49 8153 / 28 - 3214, E-Mail: johannes.koeppern@dlr.de

Aktuelle Fahrdynamikregelsysteme werden auf Basis einfacher Streckenmodelle synthetisiert. Durch diese Modelle werden die vorhandenen Nichtlinearitäten nur grob approximiert. Weiter wird den Regelsystemen nur eine unvollständige und ungenaue Schätzung des Fahrzustandes und der Umweltparameter zugeführt. Daher kann heute nicht das vorhandene fahrdynamische Potential des Fahrzeugs vollständig zugänglich gemacht werden.

In entstehenden Fahrzeuggenerationen steigt die Zahl der Aktuatoren u. A. durch Einzelradantriebe und gelenkte Hinterachsen. Ohne neue Regelungsansätze wie die *integrierte Fahrwerkregelung* (iFR) kann das neu gewonnene Potential nicht erschlossen werden.

1 Problemstellung

Das Straßenfahrzeug soll eine Beschleunigungsanforderung $\underline{a} \stackrel{!}{=} \underline{a}_{ref}$ sofern physikalisch möglich umsetzen. Die Beschleunigung \underline{a} setzt sich dabei aus den translatorischen Beschleunigungen in Läng- und Querrichtung sowie aus der Drehbeschleunigung um die Hochachse zusammen, $\underline{a} \in \mathbb{R}^3$. Auf Grund des nicht-linearen Reifenverhaltens resultiert das Gesamtfahrzeugmodell in einer nicht-linearen Differentialgleichung. Durch die Stellmöglichkeiten \underline{u} kann die Fahrzeugbewegung beeinflusst werden. Der Vektor \underline{u} setzt sich u. A. aus Antriebs- und Bremsmomenten und den stellbaren Lenkmomenten zusammen. Durch einzeln angetriebene, gebremste und gelenkte Räder wird die Strecke überaktuiert. Gilt $\dim \underline{u} > \dim \underline{a}_{ref}$, können weitere Ziele neben der Umsetzung der Bewegungsanforderung erreicht werden. Ziele sind neben anderen die Steigerung der Sicherheitsreserve, des Fahrkomforts und die Energieoptimalität. Diese werden durch die Zielfunktion c quantifiziert. Die Aufgabenstellung für das Fahrdynamikregelsystem kann als das nicht-lineare Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} & \min_{\underline{u}} c \\ \text{s. t. } & \underline{a} = \underline{a}_{ref} \\ & \underline{u}_{min} \leq \underline{u} \leq \underline{u}_{max} \\ & \dot{\underline{u}}_{min} \leq \dot{\underline{u}} \leq \dot{\underline{u}}_{max} \end{aligned} \tag{1}$$

formuliert werden. In (1) werden Stellgrößen- und Stellratenbeschränkungen in Form von Ungleichheitsnebenbedingungen berücksichtigt.

Das Optimierungsproblem muss

- robust,

- in Echtzeit und
- hinreichen häufig

gelöst werden. Die Erfüllung der Gleichheitsnebenbedingung (GNB) ist für die Fahrt sicherheitskritisch. Ihre möglichst exakte Einhaltung muss garantiert werden können. Eine Abweichung ist nur zulässig, kann die Beschleunigungsanforderung \underline{a}_{ref} physikalisch nicht umgesetzt werden.

2 Regelungskonzept

Die geregelte Strecke ist in Abbildung 1 dargestellt. Durch E/A-Linearisierung im inversen Modell wird die Strecke gesteuert. Um Abweichungen von Streckenmodell im Regler und Strecke zu begegnen, wird um inverses Modell und Strecke ein Regelkreis geschlossen. Ein einfacher äußerer Regler, z. B. ein *PID*-Regler führt die Fahrzeugbeschleunigung \underline{a} auf die gewünschte Referenzbeschleunigung \underline{a}_{ref} . Hierdurch ist die GNB in (1), sofern physikalisch möglich, erfüllt.

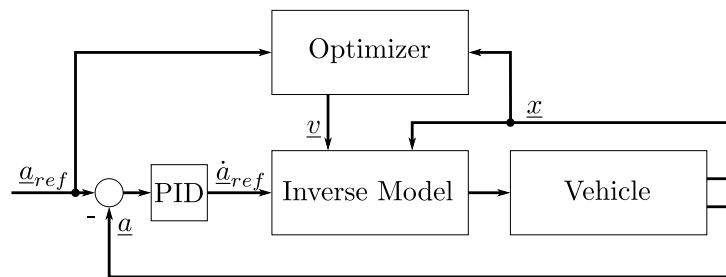
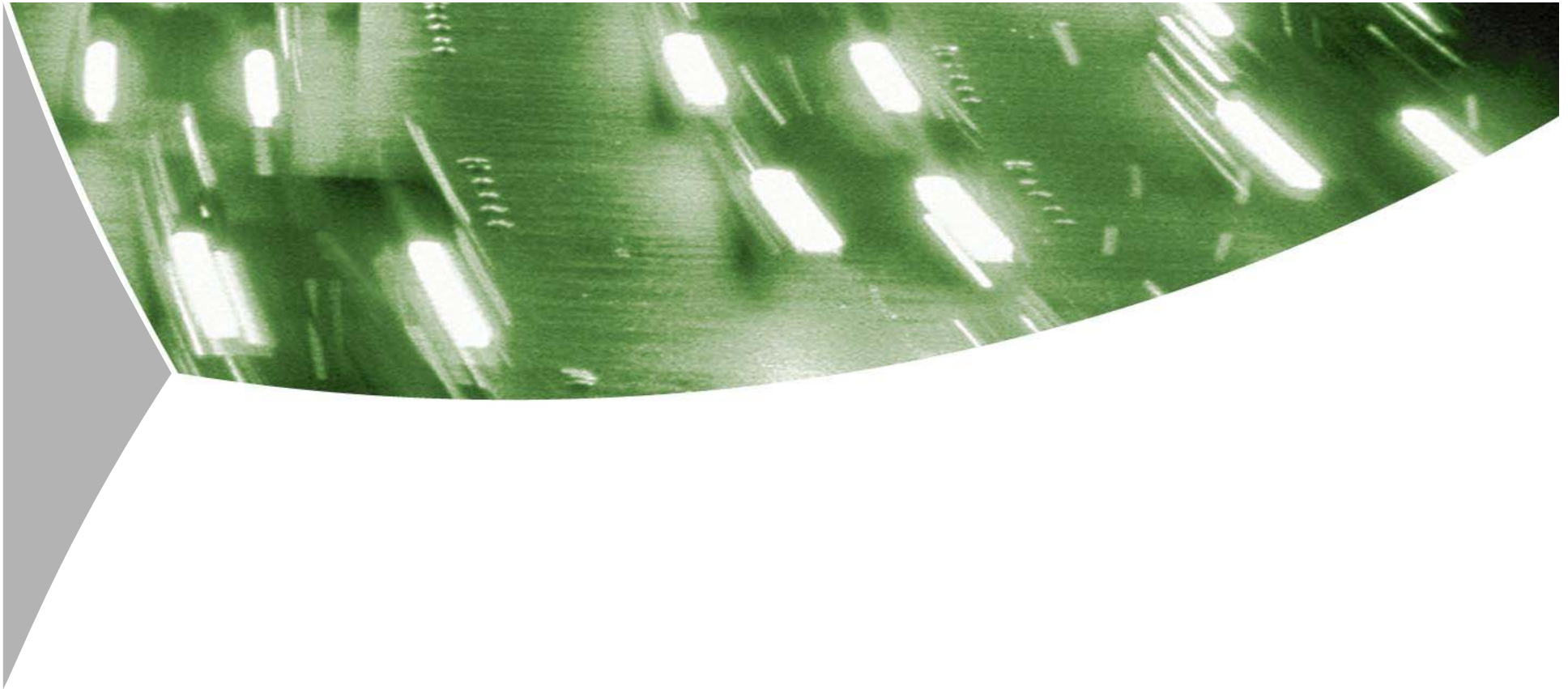


Abbildung 1: Struktur des Regelkonzeptes

Im Falle einer überaktuierten Strecke werden zusätzliche Eingänge, sog. Tuner \underline{v} , in das inverse Modell eingeführt. Die Wahl der Tuner ist entkoppelt von der GNB in (1). Sie werden zur Minimierung der Zielfunktion c und zur Einhaltung der Ungleichheitsnebenbedingungen von einem Optimierungsalgorithmus gewählt.

Für die Reglersynthese wird ein Starrkörper-Fahrzeugmodell mit einem nicht-linearen Reifenmodell verwendet. Die Beschleunigungsänderung im Schwerpunkt \underline{a} ist flacher Ausgang der Strecke bezüglich den Drehmomente und Lenkwinkelraten als Eingänge. Sowohl Drehmomente als auch Lenkwinkelraten können in guter Näherung bei realistischen Fahrzeugen direkt gestellt werden. Das analytisch erzeugte inverse Modell wird weiter angepasst, um dessen Robustheit auch in singulären Punkten garantieren zu können.

Die Zielfunktion wird für das Ende eines Prädiktionshorizontes ausgewertet und für diesen Zeitpunkt minimiert. So kondensiert das Optimierungsproblem in einen nicht-linearen modellprädiktiven Ansatz.



Integrierte Fahrwerkregelung

Johannes Köppern, DLR



Ziele

- Durch die *integrierte Fahrwerkregelung* (iFR) wird das gesamte fahrdynamische Potential zugänglich gemacht. Dies geschieht durch
 - Präzise Streckenmodelle im Regelsystem und
 - Eine übergreifende Betrachtung aller zur Verfügung stehenden Aktuatoren und der gesamten Bewegungsanforderung.
- *Optimale* Regelung überaktuierter Fahrzeuge.
- Schnittstelle zur höher liegenden Ebene der Bewegungsanforderung.

Modellbildung mit Modelica

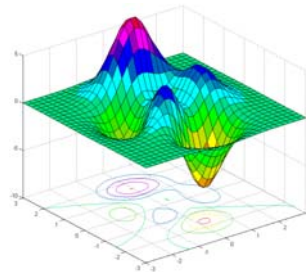
- Die Strecke ist in Modelica modelliert. Der Regler ist in dieser Umgebung entworfen.



- Das Modelica-Modell von Fahrzeug und Reifen kann analytisch invertiert werden.

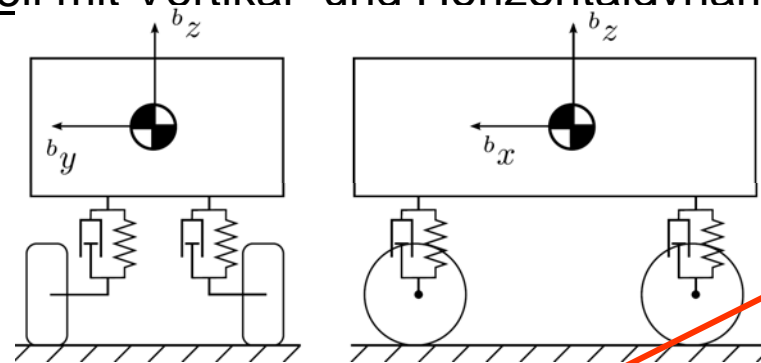
$$y = f(x) \iff x = f^{-1}(y)$$

- Optimierungsumgebung MOPS ist in Modelica verfügbar.



Fahrzeugmodell I/II

- Zweispurmodell mit Vertikal- und Horizontaltdynamik



Überaktuiert

➤ Eingänge

- Antriebs- und Bremsmomente, $\in \mathbb{R}^4$
- Lenkwinkelraten $\in \mathbb{R}^4$

$\in \mathbb{R}^8$

➤ Ausgänge

- Zwei translatorische,
- Eine rotatorische Beschleunigung

$\in \mathbb{P}^3$

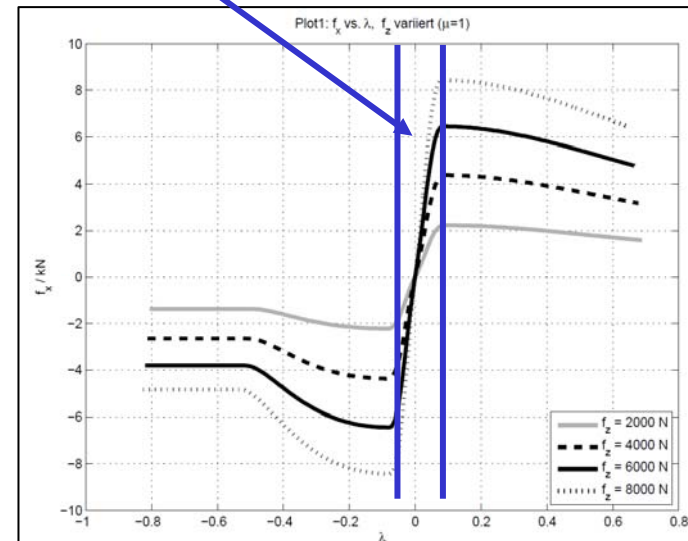
- Mit den Drehmomenten als Eingänge können Kopplungen wie z. B. durch ein Achsdifferential abgebildet werden.
- Die Lenkwinkelrate kann in guter Näherung *direkt gestellt* werden.



Fahrzeugmodell II/II

Stabiler Bereich

- Die Reifenkraft f ist eine nichtlineare Funktion in
 - Dem Längs- und dem Querschlupf,
 - Der Radaufstandskraft,
 - Dem Reibbeiwert und
 - Dem Radsturz.



- Der Radsturz ist der relative Geschwindigkeitsunterschied zwischen Reifen und Straße:

Winkelgeschwindigkeit Rad
Reifenradius

$$s_x = \frac{\omega R - v \cdot \cos(\delta)}{v}$$

$$s_x = \frac{\omega R - v \cdot \sin(\delta)}{v}$$

Fahrzeuggeschwindigkeit
Lenkwinkel



Problemformulierung

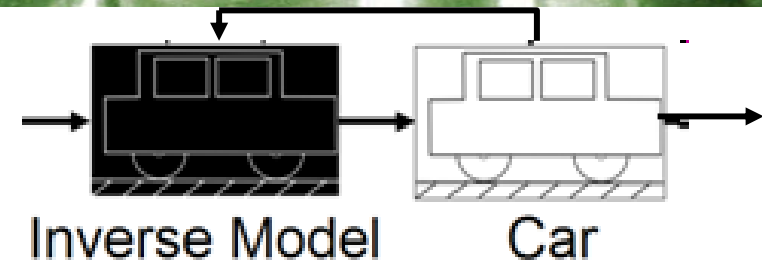
- Aktuelle und kommende Straßenfahrzeuge sind überaktuiert. Somit kann mehr als nur die Bewegungsanforderung umgesetzt werden.
- Beispiel für zusätzliches Ziel: Minimierung des Ausnutzungsgrades des Kraftschlusspotentials der Reifen.
- Die Aufgabe für die Fahrwerkregelung kann als

$$\begin{aligned} & \min_{\underline{u}} c \\ \text{s. t. } & \underline{a} = \underline{a}_{ref} \\ & \underline{u}_{min} \leq \underline{u} \leq \underline{u}_{max} \\ & \dot{\underline{u}}_{min} \leq \dot{\underline{u}} \leq \dot{\underline{u}}_{max} \end{aligned}$$

formuliert werden. Dabei sind \underline{u} die Stellgrößen des FZGs.

- Das Optimierungsproblem ist *nichtlinear*.
- Das Problem muss in Echtzeit gelöst werden. Die Einhaltung der Gleichheitsnebenbedingung ist sicherheitskritisch.

Dynamische Inversion



- Eine Abbildung der Beschleunigungsvorgabe auf die Stellgrößen ist nicht möglich.
- Ein Referenz-Beschleunigungsänderung kann auf die gewählten Streckeneingänge projiziert werden.
- Um die überaktuierte Strecke invertierbar zu machen, werden die Tuner \underline{v} eingeführt. Neuer Eingang ist dann z. B. ein Gesamtdrehmoment. Dieses wird durch drei der Tuner auf die vier Antriebs- und Bremsmomente projiziert.
- Der Programmcode des inversen Modells wird durch automatische Codeverarbeitung in eine inverse Funktion überführt (Parser). Dabei werden die Modellzuständen zu Eingängen der Funktion.
- Aus physikalischen Gründen kann nicht jede Beschleunigungsänderung umgesetzt werden. Daher wird diese Gleichheitsbedingung aufgeweicht:

$$\underline{\dot{a}} = \underline{\dot{a}_{ref}} \rightarrow \min \|\underline{\dot{a}} - \underline{\dot{a}_{ref}}\|_p$$

Schlupfbeschränkung im inversen Modell

- Durch eine plötzliche Änderung der Umwelt (z. B. dem Übergang auf eine eisglatte Straße) oder einer ungünstigen Wahl der Tuner \underline{y} können Räder durchdrehen oder blockieren.
- Für diesen Fall holt das inverse Modell den Reifen in den stabilen Bereich des Reifenkennfelds zurück.

Wenn stabil, ...

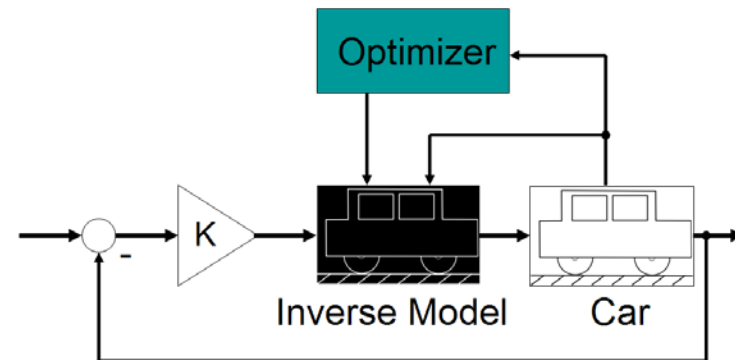
```
for i in 1:4 loop
  if etaHat[i] < 0.95 then
    M[i] = tauIM[i];
    deltadot[i] = deltadotIM[i];
  else
    der(Sxy[i]^2) = - k_Sxy * (Sxy[i]^2 / (Sxy[i]^2 + Sxy[i+4]^2));
    der(Sxy[i+4]^2) = - k_Sxy * (Sxy[i+4]^2 / (Sxy[i]^2 + Sxy[i+4]^2));
  end if;
end for;
```

dann wie errechnet,

ansonsten Schlupf reduzieren.

Verbleibendes Optimierungsproblem

- Durch das inverse Modell wird die Gleichheitsnebenbedingung (GNB) unabhängig vom Optimierer eingehalten.
- Die Lösung bzw. suboptimale Lösung des Optimierungsproblems ist nicht mehr sicherheitsrelevant.
- Das neue Optimierungsproblem lautet mit den veränderten Tunern \underline{v} :



$$\begin{aligned} & \min_v c \\ \text{s. t. } & \underline{u}_{min} \leq \underline{u} \leq \underline{u}_{max} \\ & \underline{\dot{u}}_{min} \leq \underline{\dot{u}} \leq \underline{\dot{u}}_{max} \end{aligned}$$

**Doch eingeschränkt
sicherheits-
relevant!**

- Das Optimierungsproblem kann schneller gelöst werden, da
 - Die Zahl der Tuner verringert ist und
 - Keine GNB eingehalten werden muss.



Einführen der Stellgrößen und Stellratenbeschränkungen in das inverse Modell

- Die Einhaltung der Stellgrößen- und Stellratenbeschränkungen wird vom inversen Modell überwacht.
- Stößt ein *Aktuator* an eine physikalische Grenze, wird *statt dessen* eine andere Eingriffsmöglichkeit genutzt, um die Bewegungsanforderung umzusetzen.

- Dies kann exemplarisch durch

$$\tau[i] = \max(\min(\tau_{IM}[i], \tau_{Min}), \tau_{Max});$$

$$\tau_{IM}[i] = \tau_{Total} * v[i];$$

τ_{Total} ist dabei unbekannt.

- Es resultiert das Optimierungsproblem:

$$\min_{\underline{v}} c$$

Beobachtung des äquivalenten Schlupfes



- Das Fahrzeug- und das Reifenmodell in der inversen Funktion weicht im Regelfall von der realen Strecke ab.
- Im Fahrzeug werden die momentanen Reifenkräfte und das aktuelle Fahrzeugverhalten gemessen.
- Aus diesen werden äquivalente Fahrzeugparameter und -zustände bestimmt.
- So verhält sich das Modell des Fahrzeugs im aktuelle Arbeitspunkt wie auch das reale Fahrzeug.
- Singularitäten wie der Fahrzeugstillstand können so behandelt werden. Dem inversen Modell wird eine Geschwindigkeit $v \neq 0$ und dazu passende Fahrzeugzustände übergeben.



Optimierung

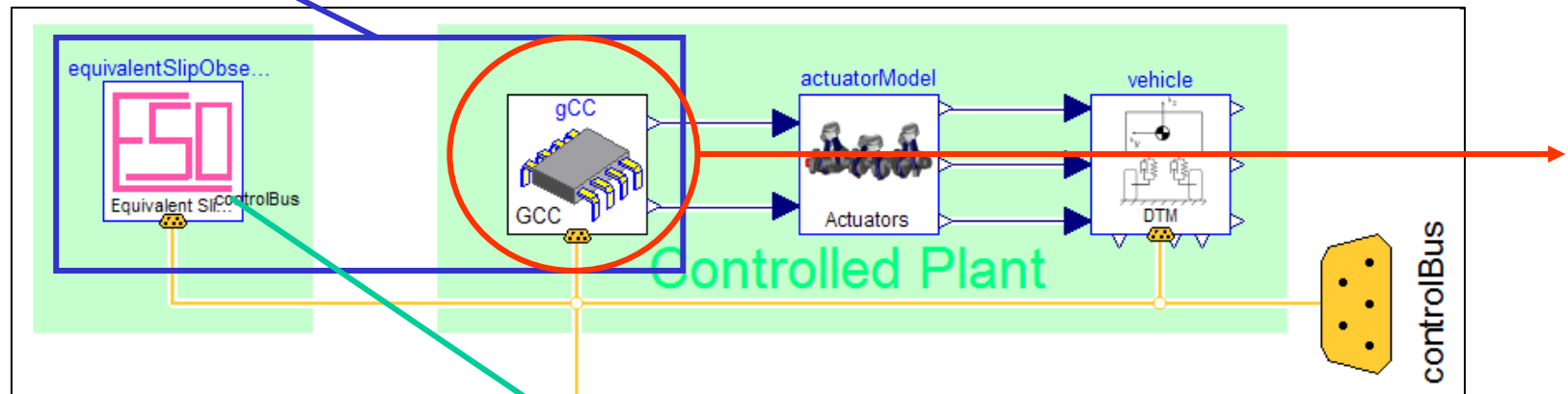
- Zielfunktion ist der maximale Ausnutzungsgrad des Kraftschlusspotentials (c ist positiv semi-definit):

$$c = \left\| \frac{f_i}{f_{max,i}} \right\|_{\infty}$$

- Durch die Stellgrößen \underline{u} kann auf die Zielfunktion c nur in der Zukunft eingewirkt werden.
- Es werden also Tuner \underline{v} so bestimmt, dass die Zielfunktion am Ende des Prädiktionshorizont T_P minimiert wird.
$$\min_{\underline{v}} c(t = t_0 + T_P)$$
- Zur Optimierung wird ein SQP-Algorithmus verwendet.
- Durch das nichtlineare Streckenmodell resultiert die Aufgabe einer nichtlinearen modellprädiktiven Regelung.
- Die Optimierung erfolgt asynchron, also zeitlich entkoppelt von der Verarbeitung der inversen Funktion.

Modelica-Modell I/II

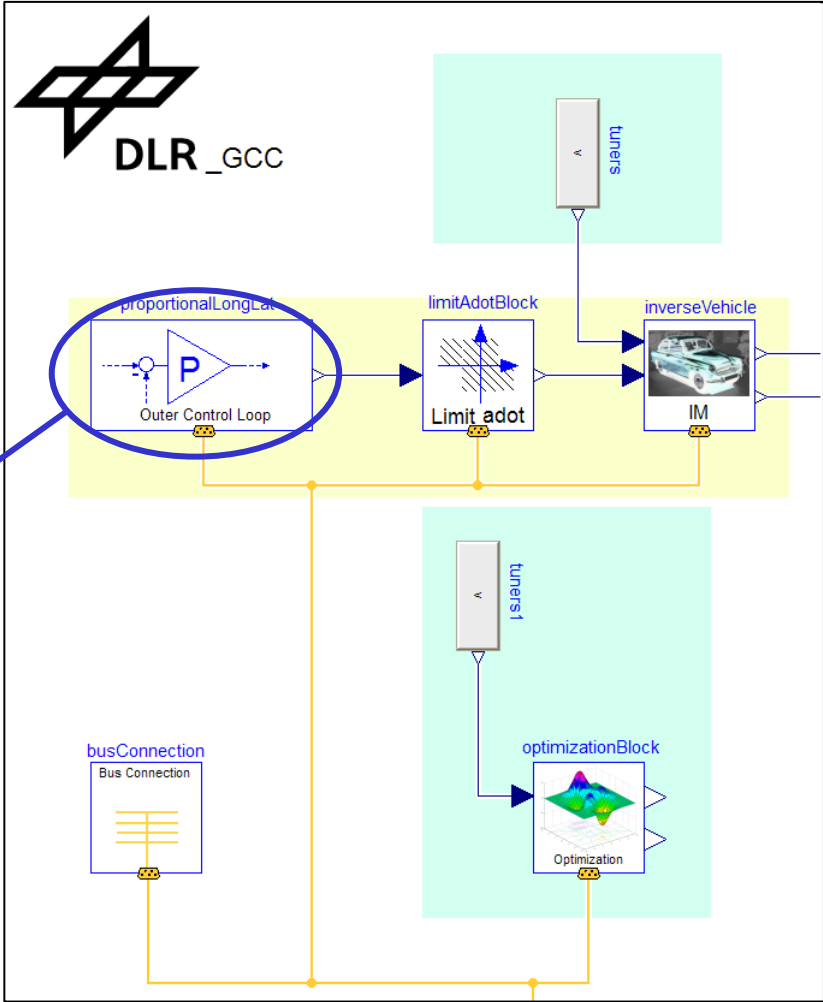
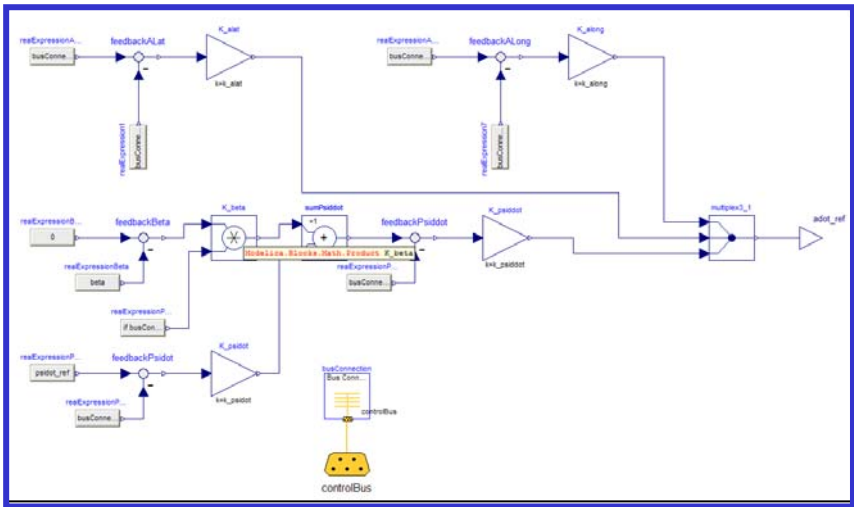
Regler



Behandlung von Abweichungen zw.
Streckenmodell und Strecke



Modelica-Modell II/II



Modellprädiktion in Modelica

- MOPS-SQP kann über die Funktion `OptimizationInSimulation()` innerhalb einer Simulation wiederholt aufgerufen werden.
- Das Strecken- und Reglermodell ohne Optimierer wird übersetzt. Es wird über Modelisars FMI aus der Funktion `CriteriaComputation()` angestoßen, um die Zielfunktion zu berechnen.
- Der Optimierer wird asynchron auf einem zweiten Prozessorkern ausgeführt. Die Kopplung erfolgt mittels FMI.





Bedarf an Rechenleistung

- Das inverse Modell kann numerisch *einfach* und damit schnell ausgewertet werden. Es errechnet alle *10 ms* neue Stellgrößen.
- Für das DLR Forschungsfahrzeug *RoboMobil* wird über 5 Tuner optimiert.
- Als Prädiktionshorizont T_p sind 100 ms gewählt.
- Die errechneten Tuner werden ebenfalls 100 ms lange aufgeschaltet (Controll-Horizont T_c).
- Die Optimierung erreicht in weniger als 80 ms nahezu optimale Ergebnisse. Sie wird auf einem Kern einer *2,49 GHz Core2 Duo* CPU unter *Windows XP* ausgeführt.
- Die Optimierung konvergierte in den bisher durchgeführten Experimenten in jedem Fall in unter *100 ms*. Da es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem Konvergenz innerhalb dieser Rechenzeit jedoch nicht garantiert werden.
- Die Berechnung der numerischen Jacobi-Matrizen kann weiter auf mehreren Kernen parallelisiert werden.